DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160106

鄂尔多斯盆地大牛地气田石炭系太原组深部煤储层非均质性特征及成因——以YM1井例

胡 渤[1]，陈 奎[1]，丁景辰[1]，李晓慧[1,*]，杨 超[2]

（1. 中国石化华北油气分公司，河南 郑州 450006；2. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083）

摘要：鄂尔多斯盆地大牛地气田石炭系太原组8号煤储层厚度较大、分布稳定、热演化程度高，具有良好的勘探开发前景。本文基于岩心观察、煤质、储层物性及地球化学特征分析，研究了YM1井太原组8号煤储层的储层非均质性特征，并探讨其成因机制。研究结果表明：①8号煤储层在纵向上表现出明显的非均质性，下段以惰质组含量较高、灰分较低的半暗煤与暗淡煤为主，并夹有炭质泥岩和粉砂质泥岩；中段主要发育半暗煤和暗淡煤，灰分高、镜质组含量低，密度大、孔隙度小；上段则以光亮煤和半亮煤为主，具有高镜质组含量、低灰分、孔隙度高及硫分偏高的特征。②8号煤储层微观孔隙结构非均质性强且具有跨尺度特征，整体以微孔最为发育，过渡孔和中孔发育较差。上段孔隙最为发育，以热成因气孔为主；中段受矿物质充填影响，总孔隙度最低，但过渡孔相对更发育。③煤相与地球化学指标显示，成煤期水位条件与植被类型的频繁变化，控制了煤储层特征及物质组成的差异性，进而导致孔隙结构发育的非均质性。④8号煤储层上段形成于深覆水、弱水动力和还原环境下，具有高镜质组含量、低灰分和孔隙高度发育的特征，表现出较高的含气性，是最优的勘探开发层段。

关键词：储层非均质性；深部煤层气；成煤环境；石炭系；太原组；大牛地气田；鄂尔多斯盆地

中图分类号：TE122. 2；P618. 1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0169-14

Heterogeneity Characteristics and Genetic Mechanisms of Deep Coal Reservoirs in the Carboniferous Taiyuan Formation, Daniudi Gas Field, Ordos Basin: A Case Study of Well YM1

HU Bo[1], CHEN Kui[1], DING Jingchen[1], LI Xiaohui[1,*], YANG Chao[2]

(1. *North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan* 450006, *China*;
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The No. 8 coal reservoir of the Carboniferous Taiyuan Formation in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin, is characterized by large thickness, stable distribution, and a high degree of thermal evolution, indicating favorable prospects for exploration and development. Based on core observations, coal petrology and coal quality analyses, reservoir physical properties, and geochemical characteristics, this study investigates the heterogeneity characteristics of the No. 8 coal reservoir in Well YM1 and discusses the controlling mechanisms. The results show that: (1) The No. 8 coal reservoir exhibits pronounced vertical heterogeneity. The lower sec-

收稿日期：2025-10-16；**修回日期：**2026-01-16；**编辑：**董立。

基金项目：国家科技重大专项（2025ZD1405901）。

作者简介：胡渤，男，高级工程师，1973年出生，目前主要从事油田开发工作。E-mail：hubo755@sinopec. com。

＊通信作者：李晓慧，女，副研究员，1985年出生，目前主要从事油气藏开发地质工作。E-mail：lixh. hbsj@sinopec. com。

引用格式：胡渤，陈奎，丁景辰，等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田石炭系太原组深部煤储层非均质性特征及成因——以YM1井例[J]. 现代地质，2026，40(1)：169-182. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160106.

HU Bo, CHEN Kui, DING Jingchen, et al. Heterogeneity Characteristics and Genetic Mechanisms of Deep Coal Reservoirs in the Carboniferous Taiyuan Formation, Daniudi Gas Field, Ordos Basin: A Case Study of Well YM1 [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(1): 169-182. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160106.

tion is dominated by semi-dull coal and dull coal with high inertinite content and low ash yield, interbedded with carbonaceous mudstone and silty mudstone. The middle section mainly consists of semi-dull coal and dull coal, characterized by high ash yield, low vitrinite content, high density, and low porosity. The upper section is dominated by bright coal and semi-bright coal, featuring high vitrinite content, low ash yield, high porosity, and relatively high sulfur content. (2) The microscopic pore structure of the No. 8 coal reservoir shows strong heterogeneity with cross-scale characteristics. Micropores are the most developed overall, whereas transitional pores and mesopores are poorly developed. The upper section has the most well-developed pores, mainly thermogenic gas pores; the middle section has the lowest total porosity due to mineral infilling, but transitional pores are relatively better developed. (3) Coal facies and geochemical indicators suggest that frequent changes in water level conditions and vegetation types during the coal-forming period controlled the differences in reservoir characteristics and material composition, thereby leading to heterogeneous pore structure development. (4) The upper section of the No. 8 coal reservoir was formed under deep-water, weak hydrodynamic, and reducing conditions, characterized by high vitrinite content, low ash yield, and highly developed porosity, resulting in high gas content and representing the most favorable interval for exploration and development.

Key words: reservoir heterogeneity; deep coalbed methane; coal-forming environment; Carboniferous; Taiyuan Formation; Daniudi Gas Field; Ordos Basin

0 引 言

近年来，深层煤层气勘探开发不断取得突破性进展，已然成为非常规天然气未来“增储上产”新领域[1-5]。最新一轮资源评价结果表明，埋深在1000～2000 m的煤层气资源约为22.5万亿m^3，2000 m以深的煤层气资源量高达40.71万亿m^3，深部煤层气展示了巨大的资源潜力[6-8]。鄂尔多斯盆地内石炭系-二叠系煤层广泛发育，其中以石炭系8号煤和二叠系5号煤发育最为稳定，支撑了鄂尔多斯盆地内超4000亿m^3的深层煤层气累计探明储量[9-10]。中国石化华北油气分公司2023年在鄂尔多斯盆地大牛地地区实施首口风险探井阳煤1HF井，峰值产气量超10万m^3/天，目前已累计产气超3200万m^3，标志着实现了深部煤层气勘探的重大突破，为致密气资源接替提供了新方向[11-12]。

与浅部煤层气相比，深部煤储层一是具有“三高一低”（高温、高压、高地应力、低渗透率）的储层特征，是多年来限制深层煤层气开发的重要因素[13]。另一方面，随勘探开发深入，深部煤层气以原生结构为主、高含气量、游离气比例高的地质特征和“见气快、初期产量高”的生产特征，提升了深层煤层气开发信心[14-18]。然而，深部煤储层在煤变质作用、沉积环境、构造演化及岩浆活动等多因素耦合作用下，普遍具有高非均质性特征[19-22]。这种非均质性不仅直接影响深层煤层气的富集成藏，还控制着压裂改造效果及产能，因此成为制约深部煤层气高效开发的关键科学问题。宏观尺度上，基于岩心、测井及地震资料数据，从区域沉积相、构造作用、煤岩类型等方面探讨煤层的非均质性特征及其对含气性、渗流特征的影响[23-24]。微观尺度上，通过多尺度定量化的煤储层孔裂隙结构表征技术，分析孔裂隙非均质性对其吸附能力和渗透性的控制作用[25-30]。然而现有研究多集中于煤层间非均质性或区域尺度特征，对煤层内垂向非均质变化特征关注不足，制约着对深部煤储层有利层段评价及深部煤层气精细开发。

本文以大牛地气田典型煤层气井YM1井为例，开展太原组8号煤储层煤质分析，孔裂隙结构表征，含气性测试，结合地球化学参数特征，系统分析煤储层层内非均质性特征，探讨其成煤过程的控制因素及非均质性形成机制，以期为深部煤层气甜点评价及储层改造提供科学依据。

1 地质背景

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地东北部，构造上位于伊陕斜坡构带（图1a）。总体构造稳定，呈SW向倾斜的大型平缓单斜构造，地层倾角小于1°[12, 31]。构造变形程度较弱，区内断裂发育较少，仅在研究区北部和东南部发育小型断层（图1b）。

晚古生代鄂尔多斯盆地处赤道湿润气候带，在区域性的海退和海侵间歇期，繁盛的成煤古植物和充沛的碎屑与成煤有机质供给形成了有利的聚煤环境。上古生界石炭系–二叠系地层中自下而上发育 5 ~ 10 套煤层，累计厚度达 10 ~ 20 m（图 1c），其中山西组 5 号煤和太原组 8 号煤层为区内主力产气煤层。形成于河流三角洲条件下的 5 号煤具有一定规模但厚度发育不稳定，连续性差，而形成于障壁海岸环境下的 8 号煤层在区内发育最为稳定且厚度大[9, 32]。YM1 井处研究区西南部，8 号煤层埋深 2873. 18 ~ 2887. 11 m，厚度约 13. 65 m，底部发育深灰色泥岩，顶部为浅灰色灰岩。

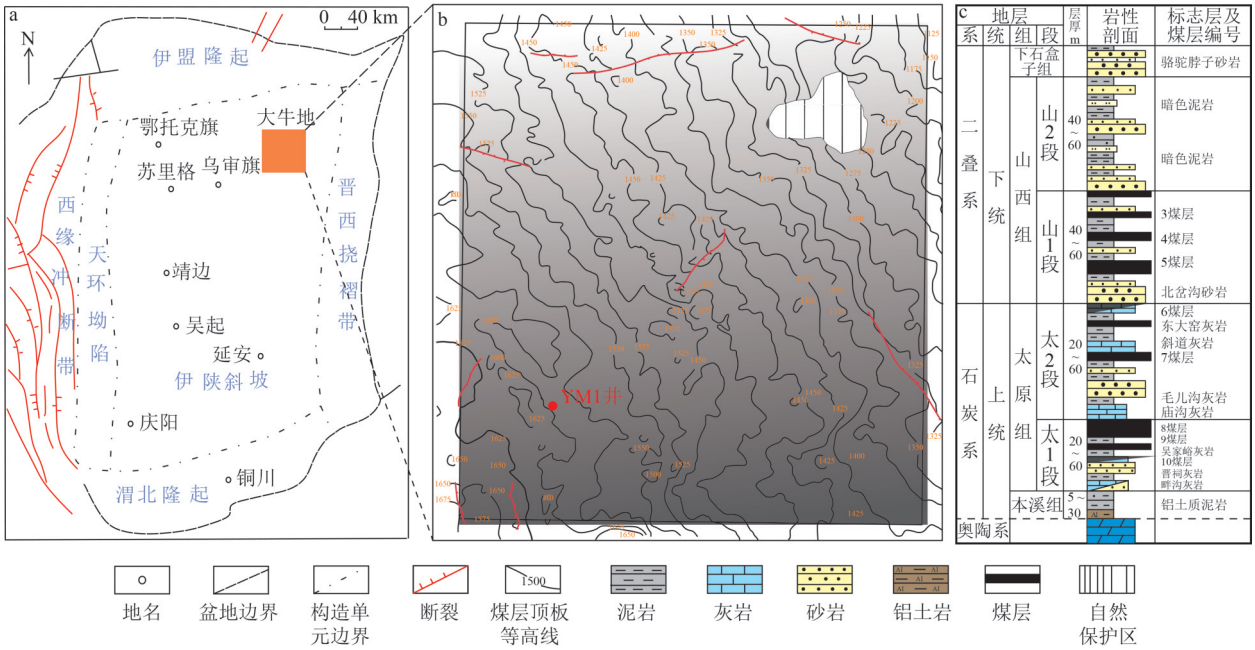


图 1　大牛地气田构造位置（a）、8 号煤层顶面构造等高线图（b）及岩性柱状图（c）

Fig. 1　Structural location of the Daniudi Gas Field （a）， structure contour map of the top surface of Coal Seam 8 （b）， and lithologic column （c）

2　样品试验测试

系统采集 YM1 井煤样品及泥岩夹矸样品 39 件。将块状煤样制备成 200 目粉样用于工业分析、总有机碳含量（TOC）、全硫含量及主微量元素测试。进行粉煤光片制备用于亚显微组分鉴定及镜质体反射率测试。制备 60 ~ 80 目粉末样品用于 CO_2 吸附、低温液氮吸附测试，准备块样以开展高压压汞测试。其中，煤样工业分析和全硫含量均按照国家标准《煤的工业分析方法：GB/T 30732—2014》进行测试。随机最大镜质体反射率（R_o）利用偏光显微镜测定。采用电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）测试主微量元素分析。

3　煤储层宏观非均质性特征

3. 1　宏观煤岩类型特征

太原组 8 号煤储层岩心观察表明，YM1 井中 8 号煤储层在岩性特征上呈现明显的非均质性特征。下部（2883. 31 ~ 2887 m）以发育半暗煤和暗淡煤为主，顶部为炭质泥岩和粉砂质泥岩夹矸，累计厚度 1. 54 m。中部（2879. 50 ~ 2883. 31 m）主要发育半暗煤和暗淡煤，其中，半暗煤累计厚度占比最大，约为 49. 34%。暗淡煤单层最大厚度可达 1. 67 m；割理和裂隙整体发育程度较低，可见少量垂直裂缝（图 2d，2e）。上部（2873. 15 ~ 2879. 50 m）以半亮煤为主，累计厚度占比达 52. 75%。半亮煤单层厚度发育较大，在 0. 1 ~ 1. 37 m 之间，平均为 0. 33 m。垂直裂隙发育，以方解石全充填为主（图 2c）。上部煤层其顶部和底部均发育一层厚度较大的光亮煤（图 2a–b），厚度可达 0. 66 m 和 0. 89 m。根据岩性发育的差异性和分段性，YM1 井 8 号煤储层自下而上被划分为 8–1、8–2 和 8–3 三个小层（图 3）。

3. 2　显微组分特征

8 号煤储层 TOC 测试表明，YM1 井 8 号煤储层 TOC 含量介于 52. 22% ~ 85. 65% 之间，均值 70. 79%

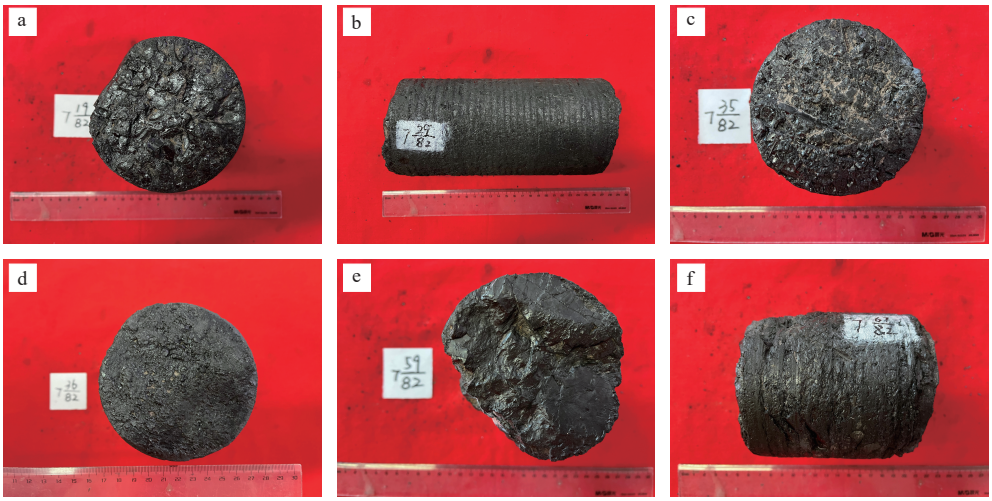


图2 YM1井8号煤储层宏观煤岩类型特征

Fig. 2 Characteristics of macrolithotypes in the Coal Seam 8 reservoir of Well YM1.

(a)光亮煤,埋深2873.83 m;(b)半亮煤,埋深2875.31 m;(c)半亮煤,埋深2876.40 m;(d)半暗煤,埋深2876.66 m;(e)暗淡煤,埋深2879.88m;(f)半暗煤,埋深2881.06 m;

(图3)。TOC含量由底部向顶部呈现显著增大的特征(图4c),表明8号储层上段呈现高有机质丰度特征。显微组分鉴定表明,YM1井显微组分以镜质组为主(44%~88.8%,平均为66.27%),惰质组次之(5.2%~44.8%,平均为21.92%),矿物组分含量变化较大,几乎不含壳质组。纵向上镜质组含量呈现逐渐增多的趋势,惰质组含量逐渐减小,矿物组分含量在8-2层含量最高(图4a)。全岩X衍射结果表明(图5),8号煤储层中矿物成分以黏土矿物为主(40.9%~99.4%,平均为85.97%),其次为方解石,平均含量为4.87%,主要以割理裂隙中方解石脉体形式存在(图2c)。部分煤样品中黄铁矿含量较高,主要以团块状和脉体形式存在。此外,煤储层中普遍含有重晶石,表明成煤中曾受到富含Ba^{2+}和SO_4^{2-}的流体活动影响。

8-1层为低镜质组含量、低矿物组分和高惰质组含量,反映了成煤初期泥炭沼泽水体较浅,水动力相对较弱,整体处于弱还原条件下。8-2层呈现较高镜质组含量、较高矿物组分及低惰质组特征。表明成煤中期在较低的沼泽水位和较强的水动力环境的泥炭沼泽中开始重新成煤,受陆源碎屑物质影响较大。8-3层表现为高镜质组含量、低矿物组分和低惰质组含量,整体水深增大,陆源碎屑输入较少,水动力条件较弱。在煤层顶部镜质组含量高达80%以上(图3),表明8号煤在成煤过程中整体表现为由弱还原环境向还原环境转变的趋势。

3.3 工业分析特征

8号煤储层工业分析表明,YM1井8号煤储层中无机质主要以灰分为主(3.92%~44.04%,平均为20.11%),挥发分含量次之(12.26%~18.56%,平均14.18%)。水分含量较低,均小于1%,平均含量约为0.57%(图4b)。8号煤储层8-1层和8-2层灰分含量均较高,属于中-高灰分煤。8-2层的灰分含量最高,平均约为27.42%,8-1层次之(均值约为23.48%)。8-3层灰分含量显著降低。挥发分含量整体较低,属于低挥发分煤。YM1井8号煤储层不同分层挥发分差异较小,呈现由下向上增大的趋势。通常镜质组中挥发分含量高于惰质组,中上部镜质组含量的增大导致了挥发分含量的这一变化趋势。不同分层水分含量变化较小,无显著差异。8号煤储层全硫含量测试表明,YM1井8号煤储层硫分含量介于0.937%~5.44%之间,均值约为2.37%,属中-高硫煤。表明8号煤成煤受海水影响较大,泥炭沼泽以还原和碱性条件为主。受海陆交互沉积环境影响,华北太原组煤层普遍具有较高硫分特征[33]。纵向上,8号煤储层中硫分含量呈现先降低后上升的特征(图4c),反映了8号煤成煤期先后经历了海进-海退-海进的旋回过程。

3.4 物理性质特征

基于氮气孔隙度及密度测试分析8号煤储层基础物理性质特征。结果表明,8号煤储层氦测孔隙

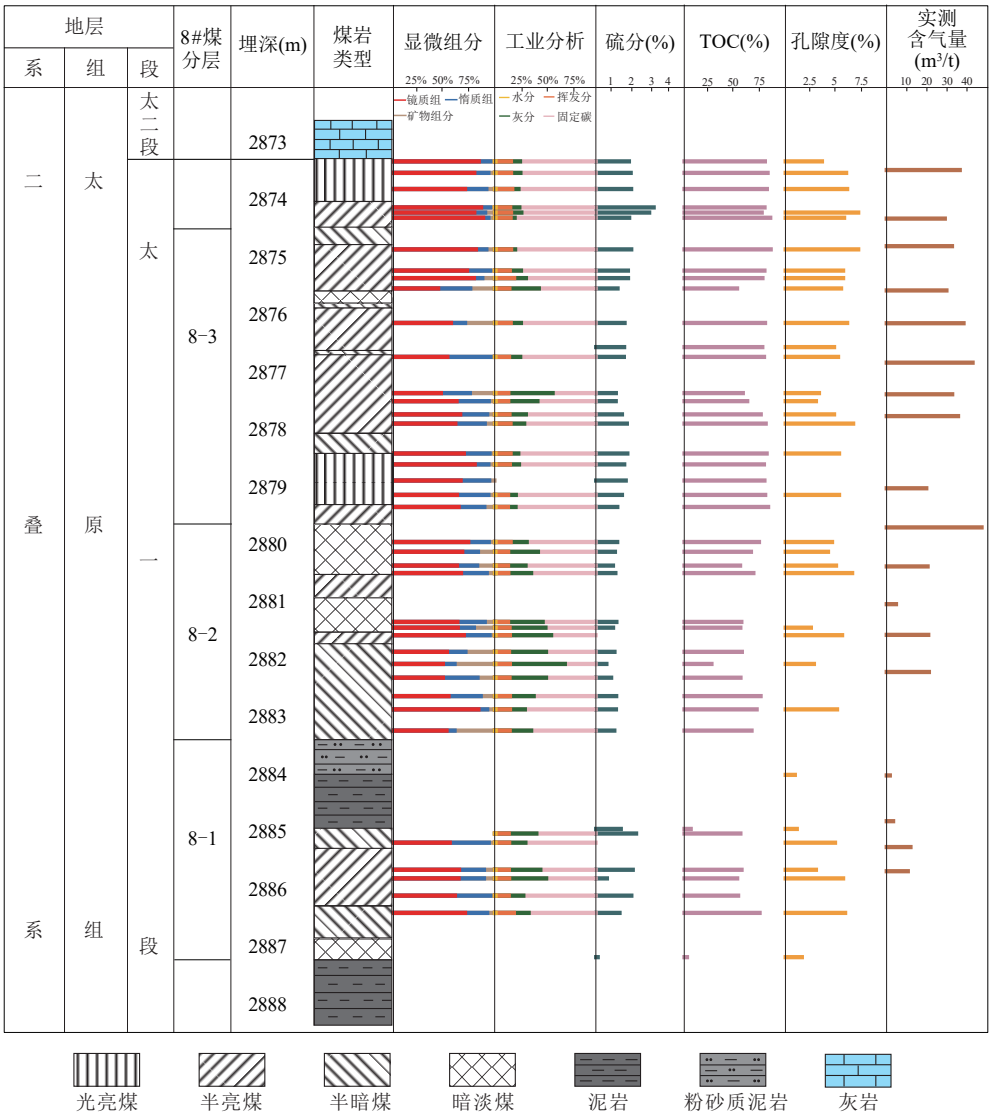


图 3　YM1 井 8 号煤储层煤岩煤质特征及含气量综合柱状图

Fig. 3　Composite columnar diagram of coal petrology, coal quality characteristics, and gas content of Coal Seam 8 in Well YM1

度介于 2.5% ~ 7.2% 之间，平均约为 5.20%，属于低孔隙度储层。不同分层孔隙度差异较小，自下而上表现为先减小后增大的趋势，8-3 层孔隙度整体较高（图 4d）。8 号煤储层视密度测试表明，其密度介于 1.31 ~ 1.83 g/cm³，平均约为 1.49 g/cm³。随埋深增大，视密度呈现增大趋势。其中 8-2 层密度变化范围较大，主要由于其半暗煤-暗淡煤较为发育，灰分含量高，而以半亮煤和光亮煤为主的 8-3 层密度较小。

3.5　热演化程度

8 号煤储层镜质组反射率测试表明 YM1 井 8 号煤 R_o 分布于 1.59% ~ 1.99% 之间，平均值为 1.72。反映了煤岩进入高成熟阶段，煤阶上属于焦煤-瘦煤阶段（图 6b），已经进入了热成因甲烷大量生成阶段[34]。表明 YM1 井中 8 号煤储层煤岩具有较高的产气潜力。垂向上，8 煤层内部热演化程度差异较小，总体呈现镜质体反射率随埋深增大而增大的趋势（图 6a），其中 8-2 层上部煤岩表现为较高的 R_o，这可能是由于 8-2 层中煤岩类型频繁变化，其镜质组的亚显微组分差异较大，导致了显著较高的 R_o。

4　煤储层微观非均质性特征

4.1　扫描电镜下的孔裂隙特征

扫描电镜观察结果显示，8 号煤储层中发育多样的孔裂隙，与矿物成分相互作用形成复杂的孔裂隙结构。孔隙类型以原生孔，气孔、晶间孔及铸模孔为主。内生裂隙和外生裂隙均有发育。原生孔主要以植物胞腔孔为主，排列有序，形状规则，呈圆形或椭圆形分布（图 7b，7d）。受埋藏和

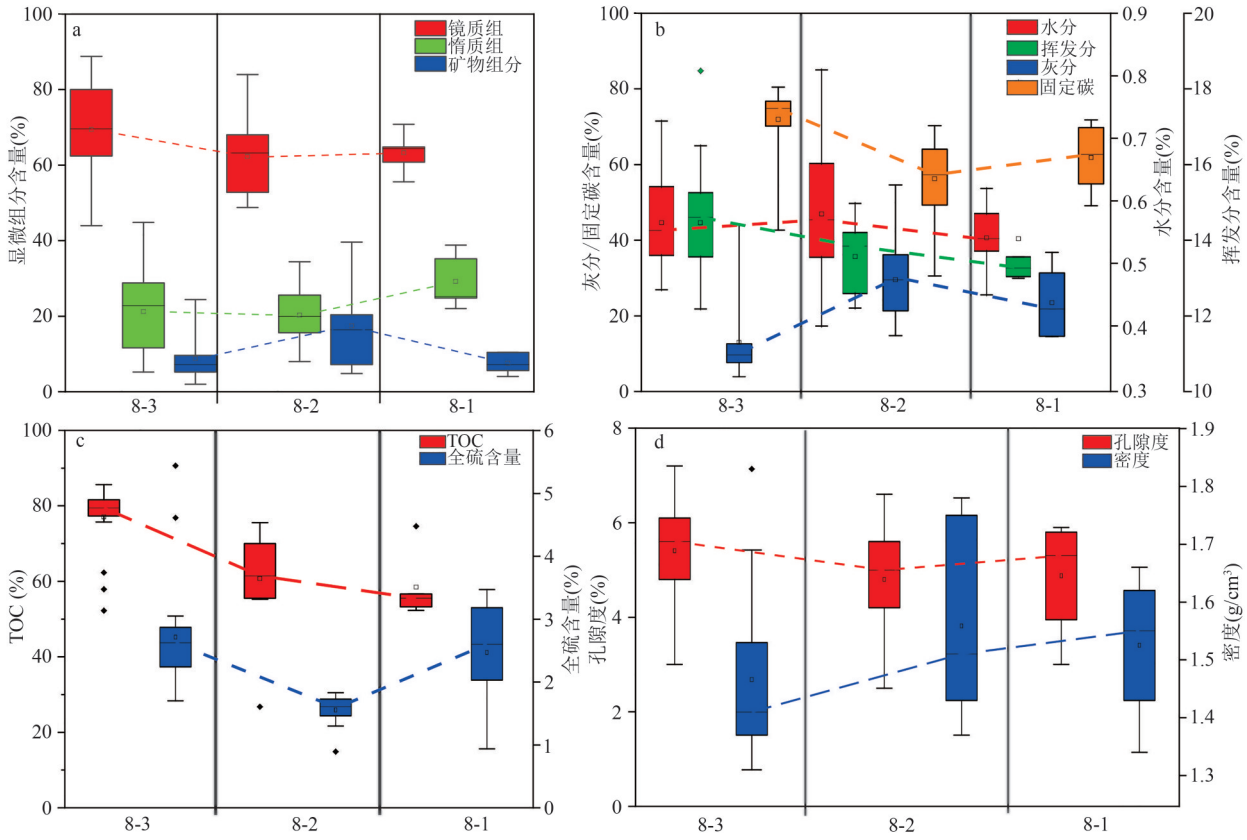


图4 不同层段8号煤储层非均质性特征

Fig. 4 Heterogeneity characteristics of Coal Seam 8 reservoir in different intervals

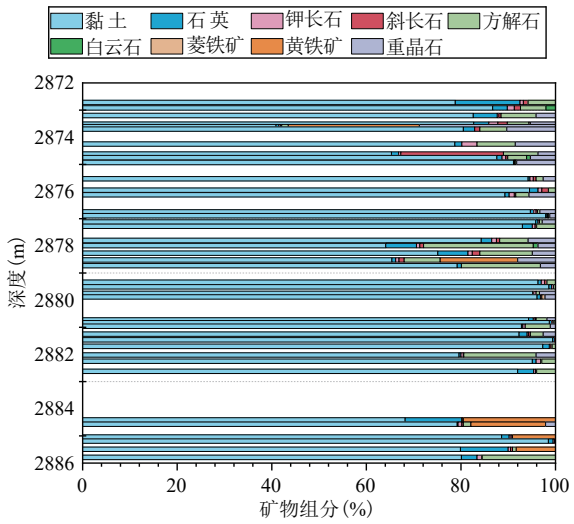


图5 8号煤储层矿物组成特征

Fig. 5 Mineral composition characteristics of the No. 8 Coal reservoir

压实作用的影响，原生孔多受挤压变形，甚至闭合（图7b）。黏土矿物的充填使得原生孔得以保持原有的形态，同时充填黏土矿物内发育的晶间孔为甲烷的赋存提供了一定的空间（图7e）。煤中的气孔多呈蜂窝状、呈群分布（图7g），是煤热变质过程中生烃后形成的，多呈圆形及椭圆形，孔隙直径介于100 ~ 500 nm之间。晶间孔和铸模孔均是由于矿物质存在而形成的孔隙。晶间孔多发育于黏土矿物间，片状和手风琴状的高岭石间形成的狭板状孔是晶间孔的主要类型（图7a，图7h）。铸模孔是煤中矿物质在有机质中因硬度差异而铸成的印坑。8号煤储层中铸模孔呈不规则状或扁平状，残留有黄铁矿颗粒（图7i）。8号煤储层中发育一些内生裂隙和外生裂隙（图7c，图7f）。主要呈多条平行分布或相互垂直，裂隙面较为平整，开度在100 ~ 500 nm之间，部分被矿物充填，多以黏土矿物为主。

4.2 全尺度孔隙结构量化特征

研究表明，基于高压压汞、低温液氮吸附及CO_2吸附的联测实验可以实现对深部煤岩的全孔径尺度的孔隙结构进行表征。本研究中采用霍多特十进制方案，将8号煤储层孔隙分为微孔（< 10 nm）、过渡孔（10 ~ 100 nm）、中孔（100 ~ 1000 nm）及大孔（> 1000 nm）四类[35]。基于三种实验所表征深层煤储层的不同孔径范围进行联合表征实现全尺度精细表征（图8）。结果表明：YM1井深层煤

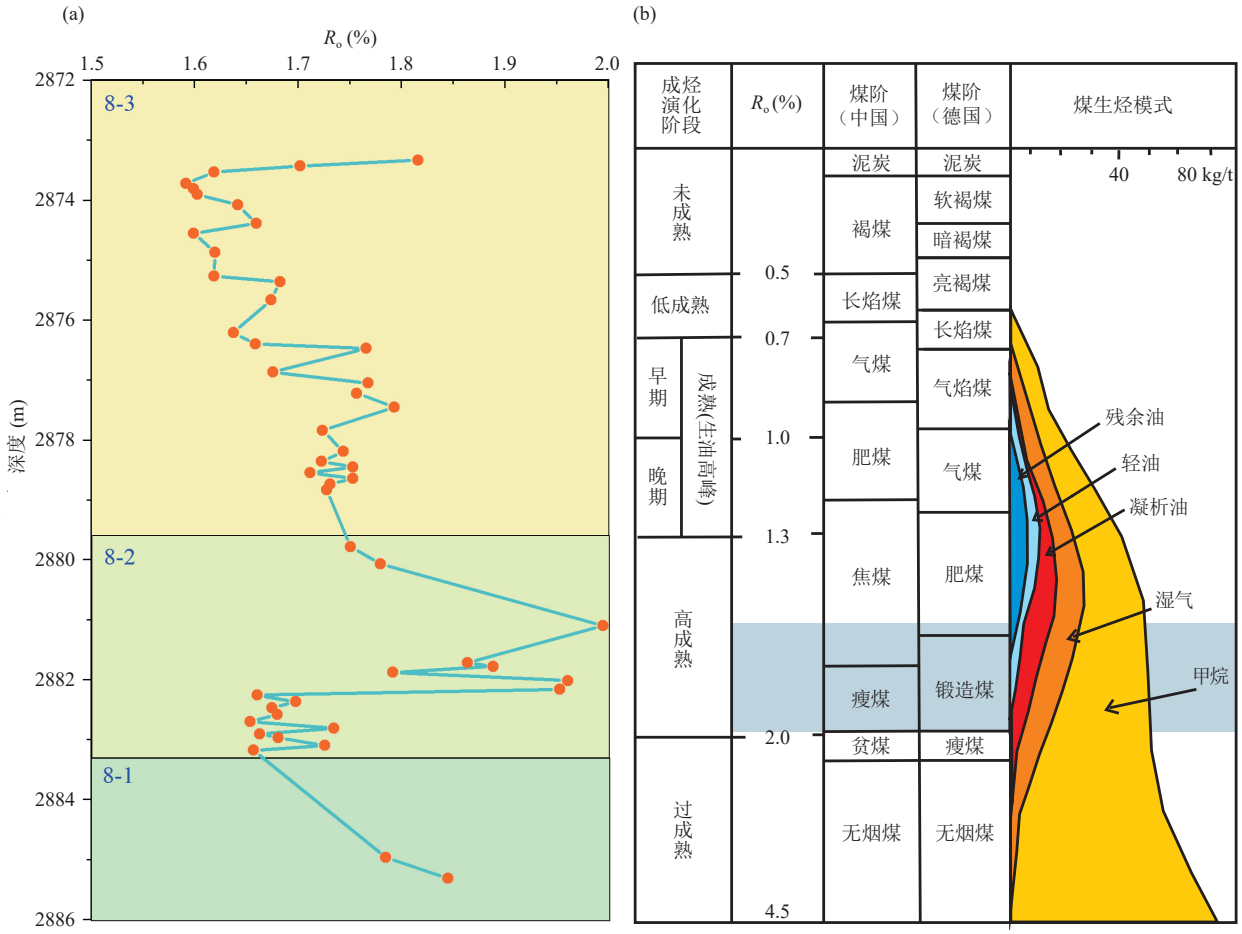


图 6　YM1 井 8 号煤热演化特征

Fig. 6　Thermal evolution characteristics of No. 8 coal seam in Well YM1

储层孔隙呈现单峰分布，其中微孔最为发育，为最主要的孔隙空间，孔隙体积占比达到 90% 以上（表 1）。同时，高比表面积有利于煤层气的吸附和富集。其次，煤中作为主要渗流通道的大孔较为发育，有利于气体的流动和产出[36-37]。而中孔体积占比相对较低，在煤储层中发育较差。全孔径表征表明 YM1 井 8 号煤储层孔隙结构具有强非均质性，跨尺度效应明显，不同尺度孔隙差异显著[38]。

不同层段孔隙结构特征具有明显差异。8 号煤储层 8-1 层和 8-2 层整体孔隙欠发育，8-3 层孔隙最为发育，孔隙体积和孔隙比表面均最大，而 8-2 层孔隙体积最小（表 1）。相较于 8-2 层，8-1 层煤储层中微孔更为发育，提供了更大孔隙体积和孔隙比表面，导致总孔隙发育程度优于中段。而 8-2 层中过渡孔最为发育，主要由于中段矿物质含量较多，镜质组含量较低，不利于微孔发育，而矿物晶间孔的存在一定程度增加了中孔的发育程度（图 7h）。

5　煤储层非均质特征成因

5.1　聚煤沼泽环境特征

5.1.1　煤相类型及特征

煤相，即煤的沉积相，被广泛应用于古泥炭沼泽沉积环境及成煤物质来源分析。依据显微组分含量可计算结构保存指数（TPI）、凝胶化指数（GI）、地下水指数（GWI）及植被指数（VI），进而反映成煤过程中植被发育特征、泥炭沼泽环境[39-42]。YM1 井 8 号煤储层的 TPI 值和 GI 值分别介于 0.07 ~ 1.46 和 1.69 ~ 20.36。由 GI-TPI 交汇图可知（图 9a），8 号煤储层主要发育于低位沼泽相和湿地草本沼泽相。GWI 值和 VI 值分别介于 0.038 ~ 0.82 和 0.08 ~ 1.51 之间。GWI-VI 交汇图表明（图 9b），8 号煤储层主要成煤植物主要以草本植物为主，水动力条件整体较弱，有利于显微组分的保存。

不同层段具有明显差异，8-1 层主要形成于湿地草本沼泽相，8-2 层形成于湿地草本沼泽相和低

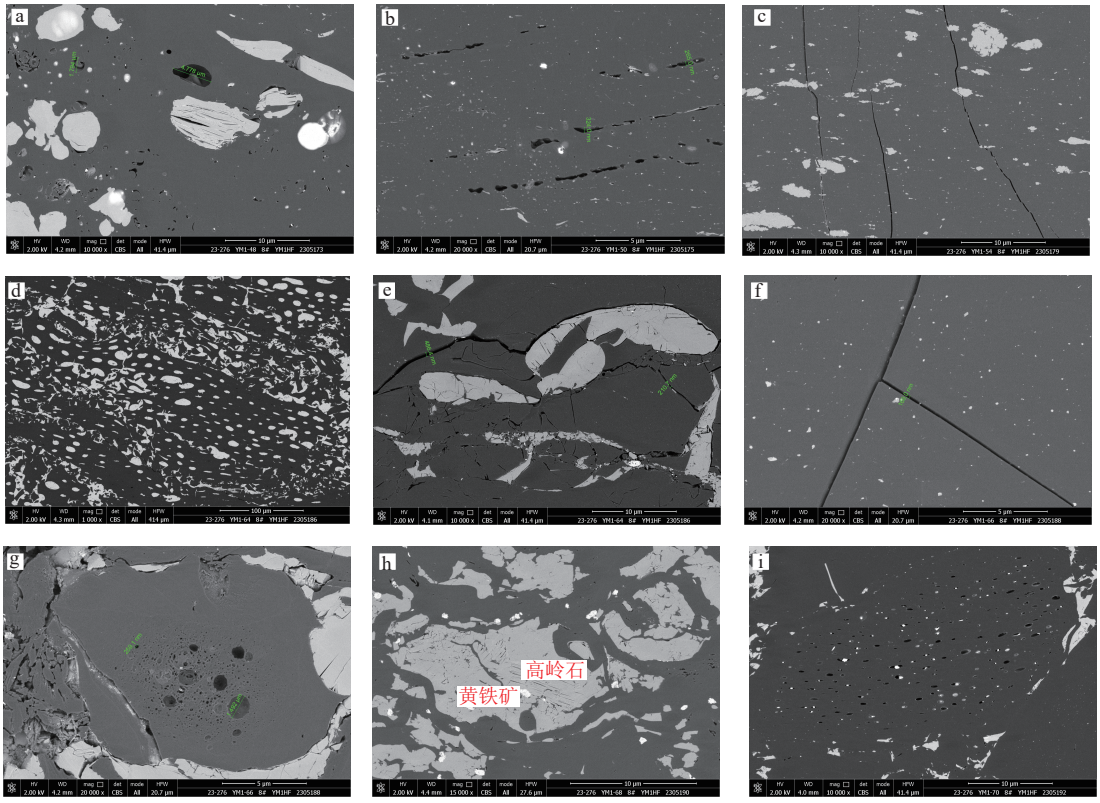


图7 扫描电镜观察的孔裂隙及矿物充填特征

Fig. 7 Characteristics of pores, fractures, and mineral fillings observed by scanning electron microscopy (SEM)

a. 发育新月形、半圆形有机质孔，部分高岭石充填，发育微孔隙，2873.20 m；b. 煤基质中串珠状原生孔，少部分孔隙充填，2873.61 m；c. 发育大量割理缝，连通性较高，部分充填高岭石，2874.75 m；d. 原生植物胞腔发育，高岭石充填，2877.12 m；e. 黏土矿物中发育狭板状孔，2877.12 m；f. 一组垂直的内生裂缝，无矿物充填，2877.8 m；g. 蜂窝状气孔与晶间孔，2877.8 m；h. 黄铁矿和黏土矿物混层，高岭石中见晶间孔，2877.8 m；i. 煤基质中发育铸模孔，部分保留黄铁矿，2879.75 m

表1 全孔径表征下的孔体积及孔隙比表面积特征

Table 1 Characteristics of pore volume and specific surface area under full pore size distribution.

样品号	微孔 (< 10 nm)		过渡孔 (10 ~ 100 nm)		中孔 (100 ~ 1000 nm)		大孔 (>1000 nm)	
	孔体积 (cm^3/g)	比表面积 (m^2/g)	孔体积 (cm^3/g)	比表面积 (m^2/g)	孔体积 (cm^3/g)	比表面积 (m^2/g)	孔体积 (cm^3/g)	比表面积 (m^2/g)
YM1-1	0.059	123.232	0.0108	2.0924	0.0018	0.0272	0.0020	0.0028
YM1-2	0.043	112.890	0.0004	0.0495	0.0022	0.0302	0.0028	0.0037
YM1-3	0.039	102.891	0.0006	0.0704	0.0024	0.0351	0.0028	0.0039
YM1-4	0.028	76.732	0.0008	0.0720	0.0017	0.0233	0.0027	0.0037
YM1-5	0.040	112.289	0.0003	0.0663	0.0027	0.0380	0.0043	0.0058
YM1-6	0.033	83.763	0.0004	0.0437	0.0016	0.0248	0.0016	0.0020
YM1-7	0.021	58.359	0.0021	0.2731	0.0019	0.0338	0.0021	0.0030
YM1-8	0.015	56.014	0.0017	0.1271	0.0009	0.0236	0.0011	0.0021
YM1-9	0.021	71.752	0.0010	0.1006	0.0012	0.0233	0.0017	0.0014
YM1-10	0.025	42.265	0.0006	0.2258	0.0018	0.0126	0.0029	0.0013
YM1-11	0.026	65.048	0.0007	0.0776	0.0013	0.0260	0.0012	0.0042

位沼泽相，GWI指数变化范围较大，表明水动力条件变化频繁，而8-3层则主要发育于低位沼泽相，且GWI值整体较低，水动力环境整体较弱。表明在泥炭沼泽发育过程中，覆水程度逐渐加深，水动力条件减弱，凝胶化作用增强。不同成煤环境控制了8号煤储层岩性特征。较深覆水深度、较

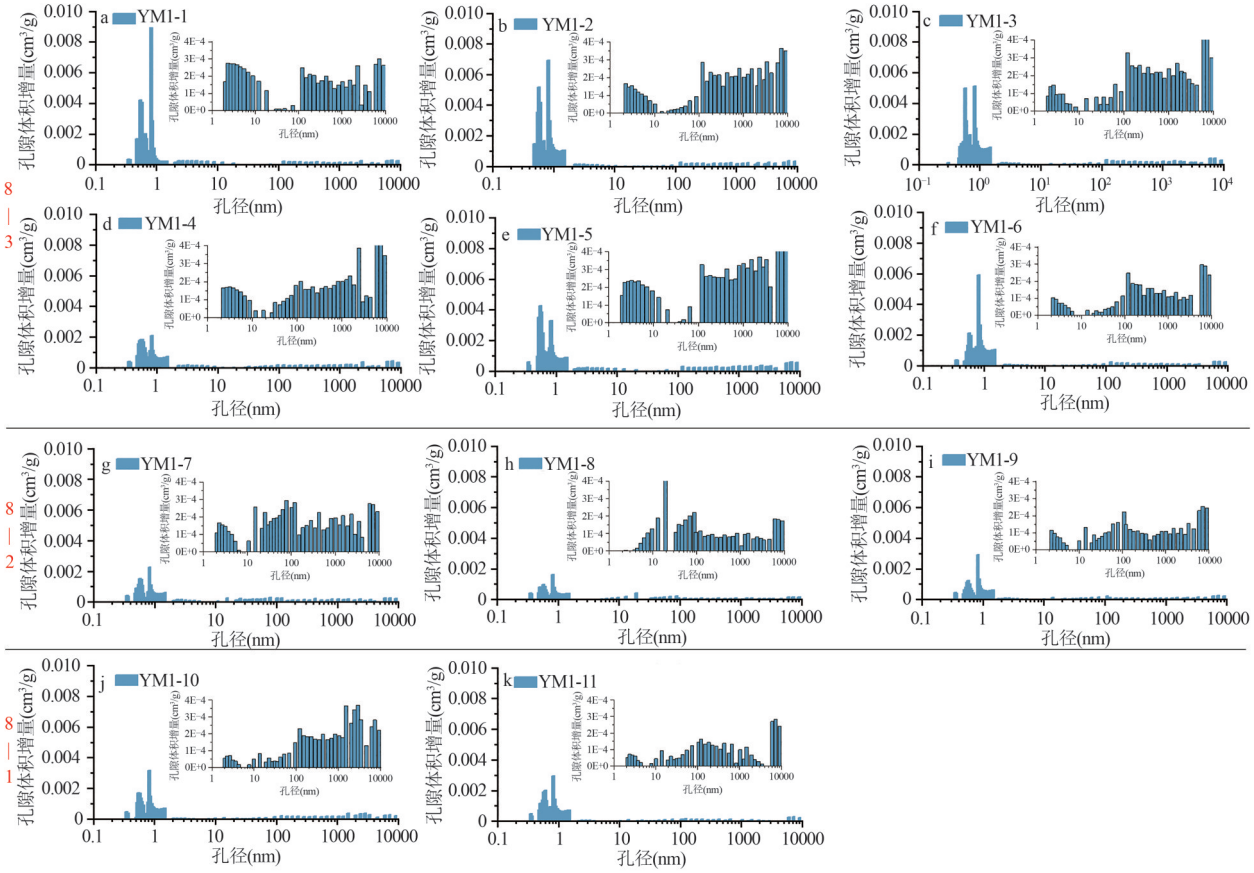


图 8　YM1 井煤岩联测下的全孔径分布特征

Fig. 8　Full pore size distribution characteristics under combined petrophysical analysis in Well YM1

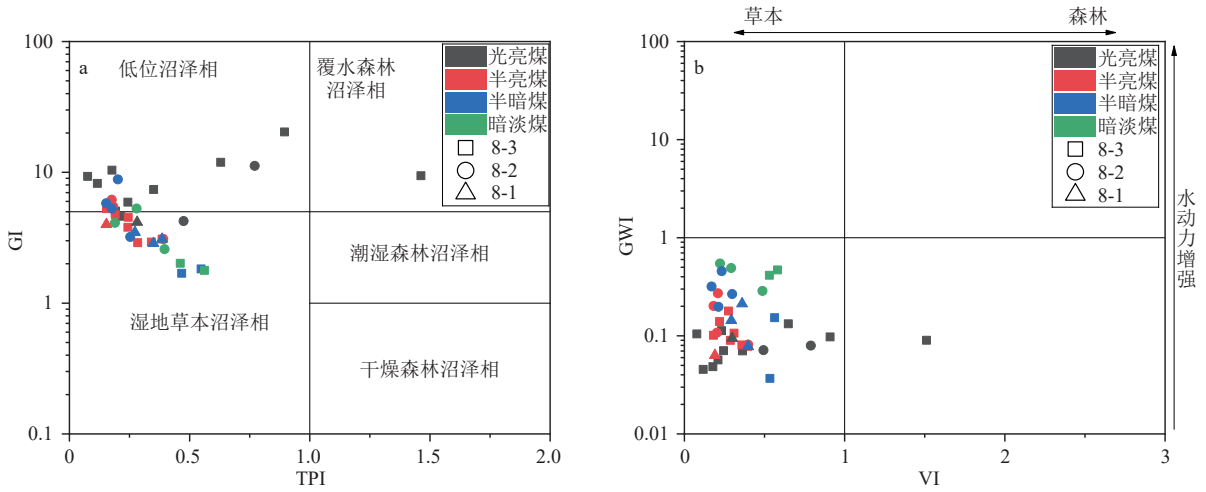


图 9　YM1 井 8 号煤储层煤相特征图

Fig. 9　Coal facies characteristics of the No. 8 coal reservoir in Well YM1

低的水动力条件及木本成煤植物更易形成光亮煤和半亮煤，因此低位沼泽相和覆水森林沼泽相是光亮煤和半亮煤形成的优势相。

5.1.2　泥炭沼泽地球化学特征

煤中主微量元素的分布特征是反映聚煤沼泽环境的有效手段。水体介质条件的差异影响着泥炭沼泽的形成及植物遗体的保存[43-45]。TiO_2–Al_2O_3交汇图（图 10a）表明太原组 8 号煤岩矿物质来源主要为基性岩和中性岩，少部分为酸性岩。不同类型煤岩中的矿物来源差异较小，光亮煤和半亮煤的母岩以中性岩为主导。Sr/Ba 值常用作反映水体古盐度的指标，常以 1.0 和 0.5 为界限，将

水体划分为淡水、半咸水和咸水[46]。图10b表明泥炭沼泽整体以半咸水-淡水为主，指示成煤期聚煤期泥炭沼泽水体相对较浅，与外部水体具有一定的连通性，盐度较低。此外，8号煤储层中Sr元素的含量随埋深减小具有明显增大特征（图10b），作为在咸水中更易稳定存在的元素，表明成煤期泥炭沼泽水体咸度逐渐升高。咸水和半咸水条件下主要发育光亮煤和半亮煤，而8号煤储层中的半暗煤和暗淡煤主要发育于淡水条件下，指示了水体的盐度是控制煤岩类型的因素之一。

煤中镜质组和惰质组含量的比值（Vi/I）和钒与镍含量的比值（V/（V+Ni））可反映泥炭沼泽的氧化还原条件。通常Vi/I大于1，表示还原环境，V/I小于1时反映氧化环境；V/（V+Ni）< 0.46，为富氧环境，0.46 < V/（V+Ni）< 0.54，为贫氧环境，V/（V+Ni）> 0.54表示厌氧环境[44]。由Vi/I-V/（V+Ni）交汇图（图10c）可知，8号煤成煤期泥炭沼泽以厌氧还原环境为主，上部煤层V/（V+Ni）值明显高于中下部，表明上部煤层成煤期水体还原性最强。此外，光亮煤和半亮煤的Vi/I和V/（V+Ni）值均较高于半暗煤和暗淡煤，表明强还原性条件成煤植物遗体凝胶化作用增强，镜质组含量增多，有利于形成半亮煤和光亮煤。

微量元素锶（Sr）和铜（Cu）为气候敏感性元素，其比值可有效反映成煤期古气候特征。由图10d可知，8号煤成煤期，以温湿气候为主。中下部煤储层均发育于温湿条件下，上部煤层成煤古气候特征波动较大，部分时期古气候较为干热。半暗煤和暗淡煤主要形成于湿润气候条件下，而光亮煤和半暗煤的Sr/Cu值变化范围较大，不同气候条件下均有发育。推测较温湿的气候条件下，化学风化作用增强，泥质碎屑输入较大，导致了煤中灰分含量增加，镜质组比例被稀释，从而形成了半暗煤和暗淡煤。而干热气候条件，沉积环境更为稳定，一定覆水条件下反而形成了光亮煤和半亮煤。

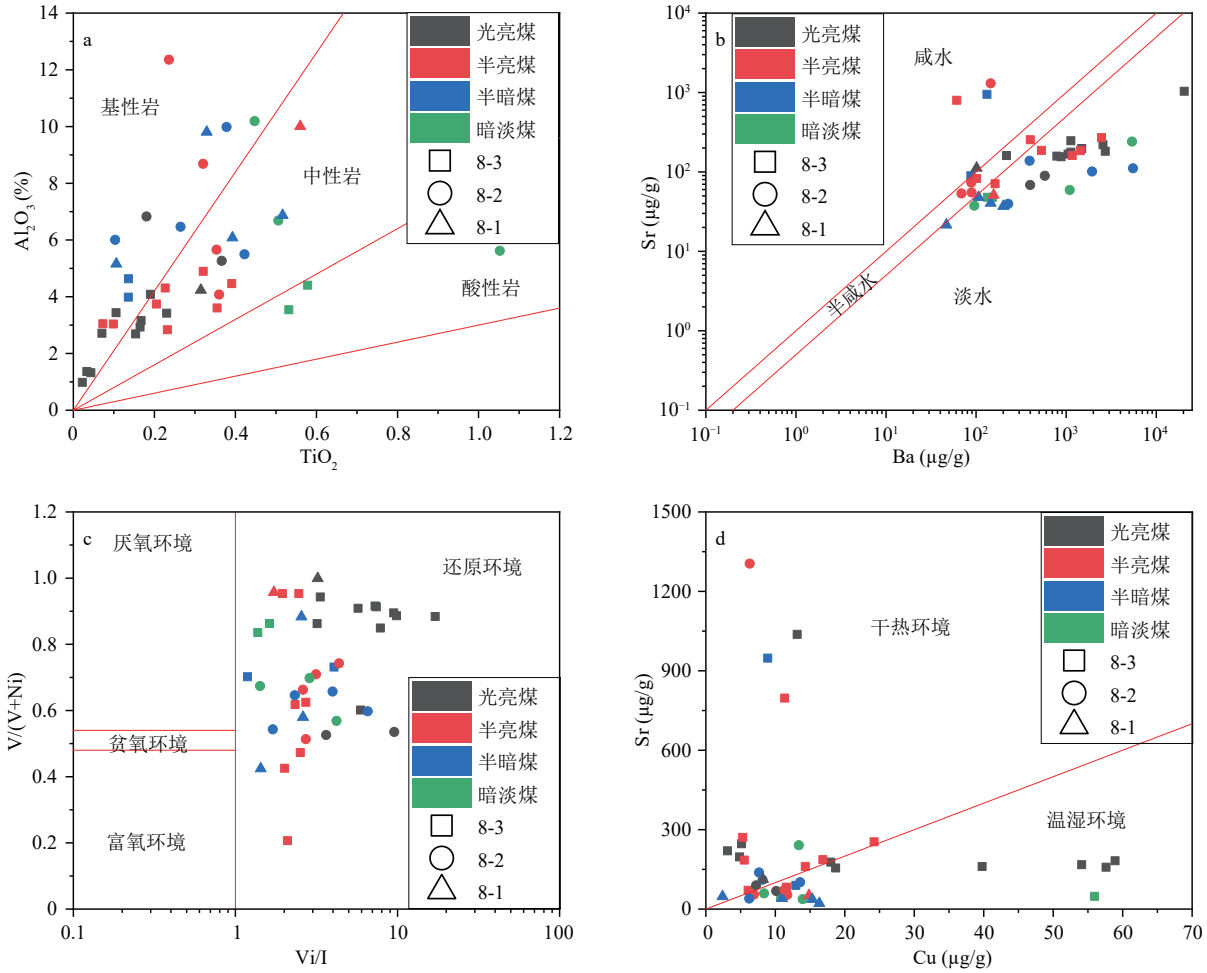


图10 8号煤成煤期古泥炭沼泽条件判别

Fig. 10 Discrimination of paleo-peat swamp conditions during the coal-forming period of No. 8 coal seam

5.2　成煤环境对煤储层的控制作用

由相关性分析图可见（图 11），泥炭沼泽古环境特征对煤储层物质组成及孔隙结构具有显著影响。GI 指数和 V/（V+Ni）值均与 TOC 和镜质组含量成明显正相关特征，表明在高水位，强还原的沼泽环境中，有机质组分累积充分，且镜质组更为发育，从而形成高镜质组和高 TOC 的物质组成特征。相反，当泥炭沼泽受外来水体补给影响显著（GWI 偏高和 V/（V+Ni）偏低），或沉积期陆源碎屑输入增强时，植物残体易于分解，氧化作用增强，同时大量矿物质沉淀和充填，煤中灰分含量升高，惰质组比例增加。

泥炭沼泽环境通过控制煤储层物质组成进而影响了储层孔隙发育特征。TOC、镜质组与微孔和总孔隙度呈显著正相关，表明高有机质输入和良好的保存条件形成的富镜质组煤在成煤过程中易形成发育的微孔体系，这是由于镜质组有机质在煤化作用过程中易产生次生微孔，有利于储层空间的发育。相反，惰质组与微孔、总孔隙度呈负相关，说明在氧化作用较强、植物残体分解充分的环境下形成的惰质组不利于孔隙的保存与发育。此外灰分含量的增加导致煤储层中中—大孔被破坏或填充，整体孔隙度降低。硫含量（S）的升高一方面反映了水体较强的还原环境，有利于孔隙的保存。另一方面其在强还原条件下易与铁结合形成黄铁矿，对中-大孔起到明显的充填作用，不利于储层孔隙连通性。

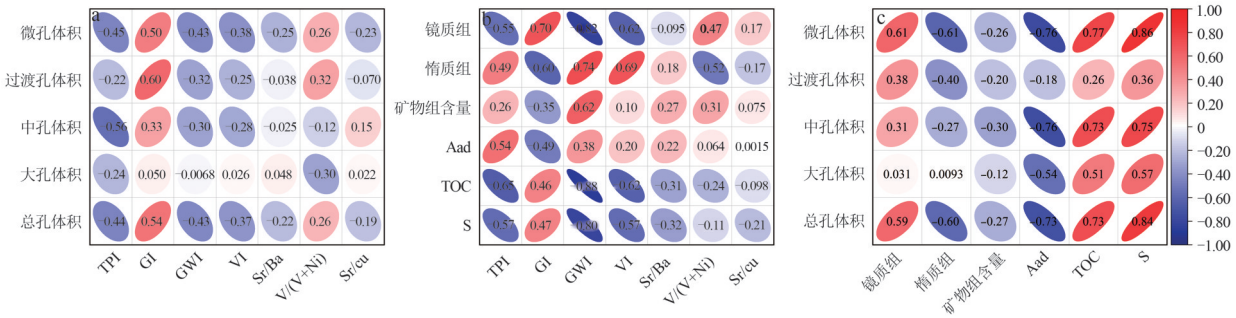


图 11　泥炭沼泽古环境特征对煤储层发育控制作用

Fig. 11　Control mechanism of paleoenvironmental characteristics of the peat swamp on coal reservoir development

5.3　成煤环境演化及非均质成因

8 号煤层成煤期泥炭沼泽地球化学指标演化特征如图 12 所示，表明沉积期水位条件及植被类型频繁变化，其控制了 8 号煤储层的纵向非均质性特征。具体而言，成煤初期以半暗煤、暗淡煤为主，夹多层泥岩和粉砂质泥岩。V/I、TPI 和 VI 等参数普遍偏低，Sr/Ba 比值较低，表明该阶段沉积环境为湿地草本沼泽，且水体能量相对较高，陆源碎屑输入频繁。氧化还原指示指标 V/（V+Ni）值偏低，TOC 含量整体较低。煤层显微组分以惰质组和矿物组分为主，镜质组含量少，灰分含量高，孔隙度和含气量均偏低（图 3），储层孔隙类型以粒间孔和裂隙为主，孔喉结构复杂，连通性差（图 11）。

成煤间断之后，VI 和 TPI 值略有上升，显示植被类型中木本成分有所增加，沉积环境转向低位泥炭沼泽，宏观煤岩类型以半亮煤、半暗煤为主，仍夹杂部分泥岩。水位条件更稳定，V/（V+Ni）及 V/Ni 比值指示表明处于氧化—还原交替环境，表明仍存在一定水动力扰动。Sr/Ba 和 CIA 值表明陆源碎屑输入量仍然较大，导致煤层中矿物质组分含量偏高。该层显微组分中镜质组比例增加，但惰质组仍占一定比例，TOC 含量有所升高，灰分含量降低，孔隙度略有改善。含气量显示该分层具有一定储气能力。

至成煤后期，V/I 和 TPI 值整体偏高，表明该段以木本植物为主，植被类型相对稳定，沉积环境主要为低位泥炭沼泽和覆水森林沼泽，有利于镜质组的大量聚集，宏观煤岩类型以亮煤、半亮煤为主。V/（V+Ni）及 V/Ni 比值指示处于偏还原环境，该沉积条件下，水体能量较低且水位波动较小，煤质均匀性较高，孔隙结构以微孔为主，具较强的气体吸附能力，含气量普遍偏高（图 2）。

8 号煤层自下而上沉积环境逐渐改善，水体能量减弱、还原性增强，导致宏观煤岩类型由下部的暗淡煤夹泥岩向上转变为光亮煤和半亮煤，TOC 和镜质组含量逐级升高，灰分逐级降低，含气性显著增强。8-3 分层因沉积环境稳定、煤质优

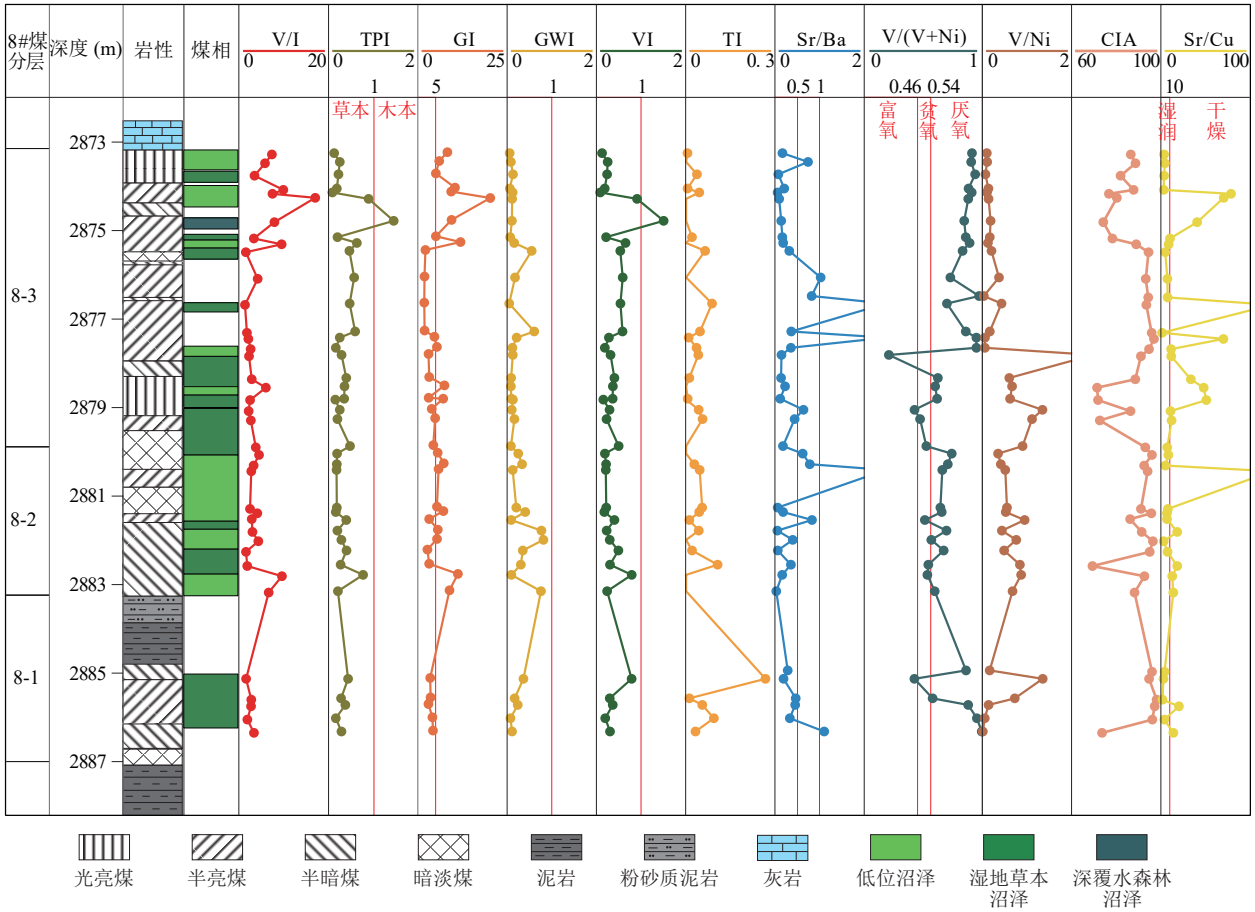


图 12 8 号煤储层成煤环境演化过程

Fig. 12 Evolution process of the coal-forming environment for the No. 8 coal reservoir

良、储气潜力大，是本井段的最优开发层段；8-2 和 8-1 分层受碎屑输入和氧化作用影响，煤质差、储层非均质性强，不宜优先开发。

6 结 论

（1）鄂尔多斯盆地大牛地气田太原组 8 号煤储层煤岩性质与组成纵向发育具有明显非均质性特征。下段以半暗煤和暗淡煤为主，发育夹矸。煤储层惰质组含量高，灰分含量低，密度较大。中段发育半暗煤和暗淡煤，呈较高镜质组，高灰分，密度大的特征。上段以半亮煤为主，以高有机质丰度，高镜质组含量，低灰分含量，较高硫分为特征。

（2）8 号煤储层孔隙特征发育呈现明显非均质特征。发育多类型孔隙。微孔最为发育，其次为大孔，过渡孔最不发育。跨尺度非均质性明显。煤储层上段孔隙发育程度最高，以发育热成因气孔群为主。中段孔隙最不发育，灰分含量高，多发育矿物晶间孔，增大了过渡孔的比例。下段孔隙发育较差，较高的惰质组含量制约了孔隙发育。

（3）古泥炭沼泽环境控制了 8 号煤储层非均质特征。成煤环境的差异影响了煤岩特征及物质组成进而导致了孔隙结构非均质性特征。形成于较深覆水，低水动力条件，较强还原条件的泥炭沼泽中容易形成高有机质丰度，高镜质组及低灰分的煤岩，进而有利于微孔及总孔隙度的发育，提升储层的物性条件及含气潜力。综合认为，8 号煤储层上段是深层煤层气勘探开发的有利层段。

参考文献：

[1] 万永平，王振川，韩双彪，等. 鄂尔多斯盆地东南缘延安气田深部煤层气成藏地质特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学，2024，35(10)：1724－1739.

[2] 徐长贵，季洪泉，王存武，等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块深部煤层气富集规律与勘探对策[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(8)：1－11.

[3] 章新文，王勇，金芸芸，等. 鄂尔多斯盆地南部旬-宜探区深部煤层气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油地质与工程，2024，38(2)：77－81.

[4] 乔博，刘海锋，贺刚，等. 纳林河地区本溪组深部煤层气地质特征及开发潜力[J]. 西安石油大学学报(自然科学版)，2024，39(5)：43－49.

[5] 唐志潭，刘敬寿，闫霞，等. 深层煤岩微构造对现今地应力的控制机理[J]. 地学前缘，2024，31(5)：344－357.

[6] 周德华，陈刚，陈贞龙，等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. 天然气工业，2022，42(6)：43－51.

[7] 秦勇，申建，史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. 煤炭学报，2022，47(1)：371－387.

[8] 鞠玮，陶树，杨兆彪，等. 中国深部煤层气研究与勘探开发现状及其发展趋势[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：9－16.

[9] LIU Z Q，ZHAO S H，HU Z Q，et al. Characteristics and controlling factors of coal-measure unconventional reservoirs-A case study of the Carboniferous-Permian in the Ordos Basin [J]. Unconventional Resources，2025，6：100153.

[10] 杨栋栋，徐田武，吴早平，等. 渤海湾盆地东濮凹陷煤成气形成机理及成藏主控因素[J]. 断块油气田，2025，32(3)：398－405.

[11] 黎小伟,何发岐,曹少蕾,等. 大牛地气田深层煤层气地质-工程甜点地震预测[J/OL]. 煤炭科学技术,1－12[2026-01-22]. https://link. cnki. net/urlid/11. 2402. TD. 20250604. 1404. 005.

[12] 何发岐，雷涛，齐荣，等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田深部煤层气勘探突破及其关键技术[J]. 石油与天然气地质，2024，45(6)：1567－1576.

[13] 郭晓娇，王雷，姚仙洲，等. 深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：17－26.

[14] 李松，汤达祯，许浩，等. 深部煤层气储层地质研究进展[J]. 地学前缘，2016，23(3)：10－16.

[15] 申建，秦勇，傅雪海，等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J]. 天然气地球科学，2014，25(9)：1470－1476.

[16] ZHANG S H，TANG S H，QIAN Z，et al. Evaluation of geological features for deep coalbed methane reservoirs in the Dacheng Salient，Jizhong Depression，China[J]. International Journal of Coal Geology，2014，133：60－71.

[17] 胡鑫，姚卫江，胡正舟，等. 准噶尔盆地白家海地区西山窑组深部煤岩储层孔隙结构表征及发育主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2024，48(4)：12－23.

[18] 孙立春，刘佳，李娜，等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气井产量主控因素及合理压裂规模优化[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：43－53.

[19] 刘大锰，李振涛，蔡益栋. 煤储层孔-裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展[J]. 煤炭科学技术，2015，43(2)：10－15.

[20] 董博，曹代勇，魏迎春，等. 煤变质作用的构造物理化学机理实验研究进展[J]. 现代地质，2024，38(4)：892－909.

[21] 伊伟，熊先钺，庞斌，等. 鄂尔多斯盆地东南缘上古生界煤储层非均质性及其意义[J]. 高校地质学报，2016，22(2)：378-384.

[22] 张晓晴，康玉国，孙斌，等. 勃利盆地七台河断陷煤层气富集特征及有利区优选[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(4)：1033－1047.

[23] LIU D M，ZHAO Z，CAI Y D，et al. Characterizing coal gas reservoirs：A multiparametric evaluation based on geological and geophysical methods[J]. Gondwana Research，2024，133：91－107.

[24] ZHAO Z，LIU D M，CAI Y D，et al. Pathways and challenges of the application of geophysical techniques to multifaceted coalbed methane reservoir characterization [J]. Gondwana Research，2025，147：164－183.

[25] 冯光俊，郑司建，朱炎铭，等. 基于多重分形理论的低阶煤孔隙结构非均质性及影响因素研究[J]. 现代地质，2025,39(5):1332－1348.

[26] 刘娜，康永尚，李喆，等. 煤岩孔隙度主控地质因素及其对煤层气开发的影响[J]. 现代地质，2018，32(5)：963－974.

[27] WU Y N，TAO S，BI C Q，et al. Pore-fracture and permeability heterogeneity of different marcolithotypes of medium-rank coals in Jixi Basin，China[J]. Geoenergy Science and Engineering，2023，231：212395.

[28] 王安民，曹代勇，聂敬，等. 巨厚煤储层孔隙结构的垂向非均质性特征——以青海聚乎更矿区为例[J]. 石油学报，2020，41(6)：691－701.

[29] 王梓麟，时婧玥，杨英，等. 深层煤岩孔隙结构表征及压裂缝导流能力影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2025，55(4)：1061－1076.

[30] 徐洲，孔祥伟，谢昕，等. 天然裂缝和层理的角度对深煤层水力裂缝扩展的影响[J]. 断块油气田，2025，32(3)：493－501.

[31] 雷涛，莫松宇，李晓慧，等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田二叠系山西组砂体叠置模式及油气开发意义[J]. 岩性油气藏，2024，36(2)：147－159.

[32] 李胜利，张亚雄，于兴河，等. 含煤层系相控型致密气储层非均质性评价的沉积要素与甜点预测策略:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地学前缘，2025，32(5)：389－403.

[33] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 徐水:中国矿业大学出版社，1996.

[34] WAPLES D W，MARZI R W. The universality of the relationship between vitrinite reflectance and transformation ratio[J]. Organic Geochemistry，1998，28(6)：383－388.

[35] B. B. 霍多特. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊,王佑安,译. 北京：中国工业出版社,1966.

[36] 李阳，张玉贵，张浪，等. 基于压汞、低温N_2吸附和CO_2吸附的构造煤孔隙结构表征[J]. 煤炭学报，2019，44(4)：1188－1196.

[37] 米巨磊,靳军,向宝力,等. 准噶尔盆地侏罗系深部煤层气储层特征及其孔裂隙结构[J/OL]. 煤炭科学技术,1－18[2026-01-22]. https://link. cnki. net/urlid/11. 2402. TD. 20250725. 1322. 007.

[38] 唐淑玲，汤达祯，杨焦生，等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. 石油学报，2023，44(11)：1854－1866，1902.

[39] JIU B，HUANG W H，HAO R L. A method for judging depositional environment of coal reservoir based on coal facies param-

eters and rare earth element parameters[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109128.

[40] 李美芬, 马丹, 李磊, 等. 鄂尔多斯盆地东胜煤田侏罗系煤中元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 地质学报, 2024, 98(8): 2409 - 2423.

[41] 沈柏坪, 李荣相, 白洪涛, 等. 鄂尔多斯盆地宜川地区本溪组8号煤岩特征及成煤环境分析[J]. 特种油气藏, 2024, 31(6):32 - 38.

[42] ZHANG S H, TANG S H, TANG D Z, et al. The characteristics of coal reservoir pores and coal facies in liulin district, hedong coal field of China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81(2): 117 - 127.

[43] HAN Q C, LIU J J, SHANG N D, et al. Mineralogy and geochemistry of the Middle Jurassic coal in the southern Ordos Basin, China: Responses of element geochemical behavior to climatic changes[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2024, 648: 112284.

[44] 范立勇, 史云鹤, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系山西组深层煤岩地球化学特征及成煤环境[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 113 - 125.

[45] 石小虎, 曹高社, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组L58井铝土岩元素录井在储层预测中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(4): 50 - 61.

[46] 王国权, 孙蓓蕾, 刘超, 等. 古泥炭沉积环境及其对微量元素的控制:以宁武煤田东露天煤矿11#煤层为例[J]. 古地理学报, 2022, 24(6): 1210 - 1223.